

Ricerca di Sistema elettrico



Celle solari a film sottile di nuova generazione per
applicazione in serre fotovoltaiche (LA2.9)

P. Morvillo, R. Ricciardi, M. Ferrara, P. Scognamiglio, A. Citarella, G. Piantadosi, S. De Vito,
G. Loffredo, L. V. Mercaldo, P. Delli Veneri

CELLE SOLARI A FILM SOTTILE DI NUOVA GENERAZIONE PER APPLICAZIONE IN SERRE FOTVOLTAICHE (LA2.9)

P. Morvillo, R. Ricciardi, M. Ferrara, P. Scognamiglio, A. Citarella, G. Piantadosi, S. De Vito, G. Loffredo, L. V. Mercaldo, P. Delli Veneri

ENEA - TERIN

Dicembre 2024

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2022-2024

Obiettivo: Decarbonizzazione

Progetto: 1.1 "Fotovoltaico ad alta efficienza"

Linea di attività: LA2.9

Responsabile del Progetto: Paola Delli Veneri, ENEA

Responsabile Linea di Attività: ENEA

Mese inizio previsto: 01/11/2022

Mese inizio effettivo: 01/11/2022

Mese fine previsto: 31/12/2024

Mese fine effettivo: 31/12/2024

Indice

1	Risultati attesi	5
2	Risultati ottenuti.....	6
3	Prodotti attesi	7
4	Prodotti sviluppati	8
5	Analisi degli scostamenti su attività e risultati.....	9
6	Sintesi delle attività svolte	10
7	Dettaglio delle attività svolte.....	11
7.1	Realizzazione di celle a film sottile su scala di laboratorio.....	11
7.1.1	Celle solari a film sottile spettralmente selettive a base di silicio	11
7.1.2	Celle solari a film sottile di tipo organico	13
7.2	Realizzazione di un prototipo di serra con copertura FV.....	15
8	Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte.....	24
9	Pubblicazioni scientifiche	25
10	Eventi di disseminazione	26

Indice delle figure

Figura 1 – Architettura della cella solare a film sottile di silicio spettralmente selettiva. Sul vetro viene depositato il contatto frontale realizzato con 180 nm di un film di ossido trasparente conduttivo (TCO), la giunzione p-i-n a film sottile di silicio e il contatto posteriore che rappresenta il riflettore selettivo, il cosiddetto MOMO (metallo/ossido/metallo/ossido), ottenuto con i materiali e gli spessori indicati in figura. Tale stack di materiali era stato depositato su vetri 10 x 10 cm ² per realizzare i filtri ottici utilizzati per la sperimentazione delle piante nello scorso triennio del progetto.	11
Figura 2 – Celle solari da 1 cm ² realizzate su substrati di vetro da 10 x 10 cm ² ricoperti di 180 nm di un film di ossido di indio e stagno (ITO). La giunzione p-i-n è ottenuta mediante tecnica PECVD crescendo 10 nm di film sottile di silicio amorfo drogato di tipo p, lo strato assorbitore, 70 nm di silicio amorfo intrinseco, e 20 nm di film sottile di silicio nanocristallino drogato di tipo n. Il contatto posteriore, MOMO, è realizzato mediante sputtering.	11
Figura 3 – Curva J-V sotto illuminazione di una delle celle solari a film sottile di silicio realizzate secondo lo schema di figura 1.	12
Figura 4 - (a) Efficienza quantica esterna (EQE) e trasmittanza (T) della cella solare la cui curva J-V è mostrata in figura 3. (b) EQE della cella solare misurata dal lato frontale e posteriore. .	12
Figura 5 – Architettura della cella fotovoltaica organica utilizzata e struttura chimica dei materiali fotoattivi.	13
Figura 6 – Spettri di riflettanza, trasmittanza ed assorbimento della blend PM6:A-4Cl depositata su vetro ed utilizzata per la realizzazione dei dispositivi.	14
Figura 7 – Caratteristica corrente-tensione sotto luce solare simulata (spettro AM1.5G) di uno dei prototipi di cella realizzati (struttura non trasparente) e curva di efficienza quantica esterna.	14
Figura 8 - (a) Caratteristica corrente-tensione sotto luce solare simulata di uno dei prototipi di cella realizzati, (b) trasmittanza e (c) foto all'aperto di una struttura semitrasparente equivalente di area di circa 10 cm ²	15
Figura 9 – Struttura della serra.	16
Figura 10 – Alloggiamento per moduli fotovoltaici semitrasparenti di dimensione 30 x 30 cm ²	16
Figura 11 – Curve Corrente-Tensione dei moduli fotovoltaici semitrasparenti a film sottile di CdTe sotto illuminazione naturale.	17
Figura 12 – Serra prototipale completa di struttura di alloggiamento moduli FV, lampade di illuminazione e attrezzatura di controllo e monitoraggio. Il prototipo comprende 2 mini-serre, una di test e una di controllo.	17
Figura 13 – Illuminazione serra.	18
Figura 14 – Spettro della lampada a LED Becar (in rosso). Come riferimento è riportato anche lo spettro solare AM1.5 (in nero).	18
Figura 15 – Architettura del sistema e caratteristiche principali dei componenti.	19
Figura 16 – La GUI presentata sul display 7" direttamente collegato all'unità di controllo.	20

Figura 17 – Foto della parete laterale che mostra la ventilazione attiva delle serre ottenuta con due ventole per lato.	20
Figura 18 – Scheda sensori e cablaggi dei singoli sensori (8 in totale).....	20
Figura 19 – Risposta normalizzata del sensore multispettrale	21
Figura 20 – Risposta normalizzata del sensore dual-band. Il canale 0 è quello broadband mentre il canale 1 è quello infrared	22
Figura 21- Modulo di power sensing. Si noti la “shunt resistance” per il monitoraggio della corrente.	22

1 Risultati attesi

Realizzazione e caratterizzazione di celle solari a film sottile di silicio spettralmente selettive su area di 1 cm². Realizzazione di un prototipo di serra su piccola scala (copertura con vetri fotovoltaici di circa 100 x 40 cm²) con una appropriata sorgente di illuminazione a LED per studiare l'uso complementare integrato della luce per fotovoltaico e fotosintesi in un ambiente controllato. Realizzazione di prototipi di modulo FV di area 10 x 10 cm² con tecnica del laser scribing per valutare la densità di potenza delle strutture semitrasparenti in studio.

Realizzazione di prototipi di celle a film sottile organico semi-trasparenti di piccola area (circa 25 mm²) con una buona trasmittanza nel range 400-700 nm di interesse per la crescita delle piante. Caratterizzazione ottica ed elettrica completa dei prototipi di celle realizzate.

2 Risultati ottenuti

Sono stati ottenuti i seguenti risultati:

- Sono state realizzate e caratterizzate celle solari a film sottile di silicio spettralmente selettive su area di 1 cm^2 .
- Sono state realizzate e caratterizzate celle a film sottile organico semi-trasparenti di piccola area (circa 25 mm^2) con una buona trasmittanza nel range 400-700nm.
- È stata realizzata una serra su scala di laboratorio (copertura di circa $100 \times 40 \text{ cm}^2$) con una appropriata sorgente di illuminazione a LED per studiare l'uso complementare integrato della luce per fotovoltaico e fotosintesi in un ambiente controllato.

3 Prodotti attesi

Rapporto tecnico dal titolo: "Celle solari a film sottile di nuova generazione per applicazione in serre fotovoltaiche" RdS_PTR22-24_PR1.1_LA2.9_426

Prototipo di serra con copertura spettralmente selettiva.

4 Prodotti sviluppati

Il presente report: "Celle solari a film sottile di nuova generazione per applicazione in serre fotovoltaiche"

Serra fotovoltaica prototipale con copertura di 9 mini-moduli FV a film sottile di silicio spettralmente selettivi (area singolo mini-modulo $10 \times 10 \text{ cm}^2$) oppure un pannello fotovoltaico semitrasparente commerciale, della dimensione $30 \times 30 \text{ cm}^2$.

5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

L'attività aveva tra i suoi obiettivi quello di realizzare dei mini-moduli FV a film sottile di silicio spettralmente selettivi su area $10 \times 10 \text{ cm}^2$ per essere utilizzati sul prototipo della serra. Tale sperimentazione è stata condizionata da problemi di delaminazione dei campioni a valle della deposizione del contatto posteriore del dispositivo, che funge anche da riflettore selettivo, costituito da uno stack metallo/ossido/metallo/ossido - MOMO, ottenuto mediante tecnica di sputtering. Si è provato a risolvere tali problematiche in vario modo (pulizia più accurata dei substrati di vetro, utilizzo di film sottile di silicio depositati in differenti sistemi PECVD e modificando le condizioni di deposizione, deposizione del MOMO in più step di processo di sputtering per evitare eventuali stress termici ai substrati) ma nessuna delle strategie adottate ha risolto il problema. Pertanto, non è stato possibile realizzare le strutture necessarie al previsto sviluppo dei minimoduli FV. Gli obiettivi della LA sono stati comunque ottenuti in quanto si è provveduto ad acquistare dei moduli FV a film sottile con diversi gradi di trasparenza che sono stati utilizzati per completare la copertura della serra.

6 Sintesi delle attività svolte

Una prima linea ha riguardato la realizzazione di celle a film sottile su scala di laboratorio per l'agrivoltaico. Sono state ottenute celle semitrasparenti spettralmente selettive in silicio amorfo da 1 cm^2 con efficienze di conversione intorno al 4%. Nella fase di scale-up, problemi sperimentali non hanno consentito di completare la realizzazione di mini-moduli. Parallelamente sono state sviluppate celle solari con materiali assorbitori organici trasparenti alla radiazione solare utile per la crescita delle piante. I prototipi realizzati (area 25 cm^2) hanno raggiunto efficienze del 14.9% (cella opaca) e 10% (cella semitrasparente).

La seconda linea di attività ha riguardato la realizzazione di un prototipo di serra fotovoltaica. La copertura può contenere 9 mini-moduli FV da $10 \times 10\text{ cm}^2$ oppure un modulo della dimensione di $30 \times 30\text{ cm}^2$. Il sistema, completamente automatizzato per il controllo remoto, è corredato da illuminazione a LED e sensoristica per il monitoraggio ambientale.

7 Dettaglio delle attività svolte

7.1 Realizzazione di celle a film sottile su scala di laboratorio

7.1.1 Celle solari a film sottile spettralmente selettive a base di silicio

Nello scorso triennio sono state progettate celle solari a film sottile di silicio in grado di trasmettere la radiazione solare nelle finestre spettrali necessarie alla crescita delle piante. A partire da tale progettazione, una volta definiti materiali e spessori, sono stati realizzati filtri FV, una sorta di precursori di moduli FV semitrasparenti su vetri 10 x 10 cm², con i quali è stata effettuata la sperimentazione sulla crescita di piante quando poste sotto tali filtri [1,2].

In questo triennio l'attività è proseguita con l'obiettivo di realizzare celle solari spettralmente selettive secondo lo schema di figura 1, progettato e validato in precedenza in termini ottici, per valutarne le prestazioni.

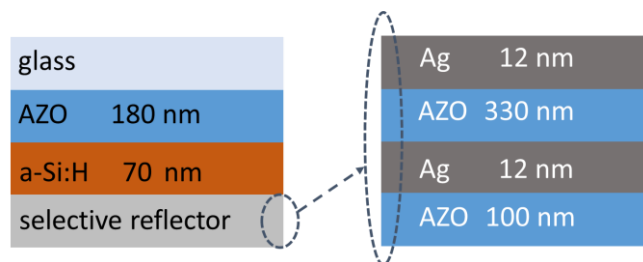


Figura 1 – Architettura della cella solare a film sottile di silicio spettralmente selettiva. Sul vetro viene depositato il contatto frontale realizzato con 180 nm di un film di ossido trasparente conduttivo (TCO), la giunzione p-i-n a film sottile di silicio e il contatto posteriore che rappresenta il riflettore selettivo, il cosiddetto MOMO (metallo/ossido/metallo/ossido), ottenuto con i materiali e gli spessori indicati in figura. Tale stack di materiali era stato depositato su vetri 10 x 10 cm² per realizzare i filtri ottici utilizzati per la sperimentazione delle piante nello scorso triennio del progetto.

Su substrati di vetro da 10 x 10 cm² sono state realizzate matrici 4x4 di celle solari di piccola area (1 x 1 cm²) semitrasparenti, come è possibile visualizzare nella figura 2, dove è mostrato il colore in trasmissione e in riflessione dei dispositivi.

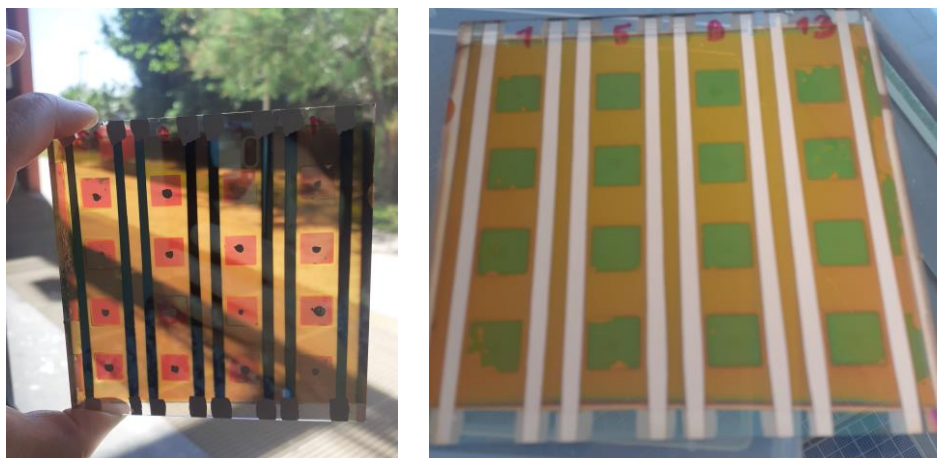


Figura 2 – Celle solari da 1 cm² realizzate su substrati di vetro da 10 x 10 cm² ricoperti di 180 nm di un film di ossido di indio e stagno (ITO). La giunzione p-i-n è ottenuta mediante tecnica PECVD crescendo 10 nm di film sottile di silicio amorfo drogato di tipo p, lo strato assorbitore, 70 nm di silicio amorfo intrinseco, e 20 nm di film sottile di silicio nanocristallino drogato di tipo n. Il contatto posteriore, MOMO, è realizzato mediante sputtering.

In figura 3 è riportata la caratteristica J-V sotto simulatore solare di una delle celle misurate durante la sperimentazione, dove sono state valutate efficienze intorno al 4%. La bassa efficienza è ovviamente attesa a causa della limitata quantità di luce che viene fatta assorbire dalla parte attiva della giunzione, ma potrebbe in parte essere dovuta a problemi di raccolta delle cariche generate per effetto di contatti elettrici non ottimali e/o ad una qualità non ideale dello strato assorbitore in silicio amorfo. È importante, tuttavia, sottolineare che le celle, essendo semitrasparenti, possiedono una bifaccialità intrinseca, come evidenziato dalla risposta spettrale di figura 4(b) dove sono confrontati i valori di efficienza quantica esterna misurati illuminando la cella dal lato frontale e posteriore, che consentirebbe migliori prestazioni per la stessa cella in condizioni operative. La figura 4(a) mostra anche l'ottimo accordo tra la trasmittanza sperimentale della cella solare (curva verde continua) e quella teorica di progetto (curva verde tratteggiata)

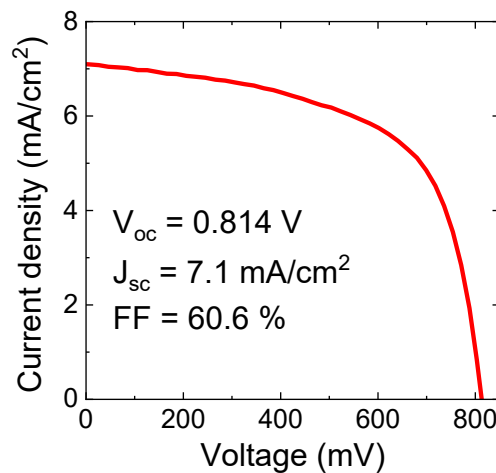


Figura 3 - Curva J-V sotto illuminazione di una delle celle solari a film sottile di silicio realizzate secondo lo schema di figura 1.

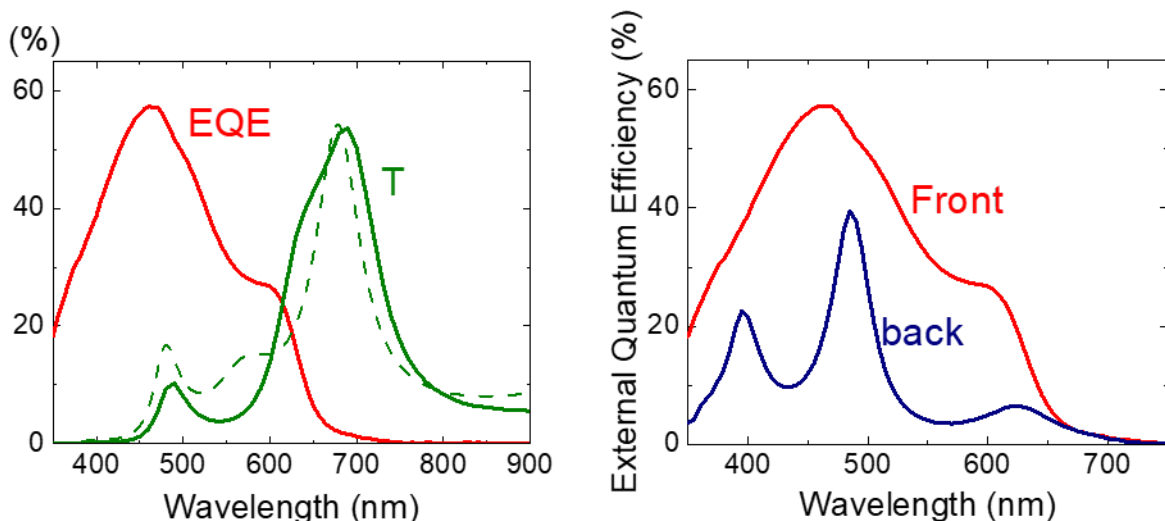


Figura 4 - (a) Efficienza quantica esterna (EQE) e trasmittanza (T) della cella solare la cui curva J-V è mostrata in figura 3. (b) EQE della cella solare misurata dal lato frontale e posteriore.

A valle di questi test su piccola area sono iniziate le sperimentazioni necessarie alla realizzazione dei moduli FV su area $10 \times 10 \text{ cm}^2$. Purtroppo, tali sperimentazioni sono state condizionate da problemi di delaminazione dei campioni a valle della deposizione del MOMO. Si è provato a risolvere tali problematiche in vario modo, tra cui una pulizia più accurata dei substrati, la modifica delle condizioni di deposizione, la deposizione del MOMO in più step di processo di sputtering per evitare eventuali stress termici ai substrati, ma nessuna delle

strategie adottate ha risolto il problema. Pertanto, non è stato possibile realizzare le strutture necessarie al previsto sviluppo dei mini-moduli FV a base di film sottile di silicio.

7.1.2 Celle solari a film sottile di tipo organico

Parallelamente allo studio di celle solari a film sottile di tipo inorganico, l'attività di ricerca ha esplorato anche il possibile utilizzo di celle a film sottile di tipo organico. Questa tipologia di dispositivi è di particolare interesse date le caratteristiche di assorbimento che possono essere modulate per renderle complementari alla luce necessaria per le piante. Pertanto, a seguito di un approfondito studio della letteratura, sono stati selezionati materiali assorbitori organici con la caratteristica di lasciare "libera" la radiazione solare utile per la crescita delle piante (buona trasparenza nel range 400-700 nm dove clorofilla-a e b e carotenoidi presentano picchi di assorbimento).

Le celle solari organiche hanno una struttura a multistrato in cui lo strato responsabile di assorbire e fotogenerare le cariche è una miscela su scala nanometrica tra un materiale organico donore di elettroni (tipicamente un polimero semiconduttore) ed uno accettore di elettroni (tipicamente una macromolecola). Tra i materiali individuati in letteratura che mostrano caratteristiche ottiche ed elettriche compatibili con le nostre esigenze, abbiamo selezionato per quanto riguarda il materiale donore il polimero PM6 (Poly[[4,8-bis[5-(2-ethylhexyl)-4-fluoro-2-thienyl]benzo[1,2-b:4,5-b']dithiophene-2,6-diyl]-2,5-thiophenediyl[5,7-bis(2-ethylhexyl)-4,8-dioxa-4H,8H-benzo[1,2-c:4,5-c']dithiophene-1,3-diyl]-2,5-thiophenediyl]) e la macromolecola accettrice di elettroni A-4Cl (2,2'-((2Z,2'Z)-((12,13-bis(2-butyloctyl)-3,9-diundecyl-12,13-dihydro-[1,2,5]thiadiazolo[3,4-e]thieno[2',3':4',5']thieno[2',3':4,5]pyrrolo[3,2-g]thieno [2',3':4,5]thieno[3,2-b]indole-2,10-diyl)bis(methanylylidene))bis(5,6-dichloro-3-oxo-2,3-dihydro-1H-indene-2,1-diylidene))dimalononitrile), che risulta sensibile nel NIR.

L'attività è continuata con la realizzazione di celle fotovoltaiche organiche basate su questi materiali. La struttura scelta è del tipo VETRO/ITO/PEDOT:PSS/blend/PFN/Ag, dove il PEDOT:PSS e il PFN sono degli interlayer rispettivamente trasportatori di lacune ed elettroni, la blend è una miscela ad eterogiunzione diffusa del polimero PM6 e della macromolecola A-4Cl, ITO (ossido di indio e stagno) è l'elettrodo frontale trasparente e Ag è l'elettrodo posteriore. In figura 5, viene riportata la rappresentazione schematica della struttura utilizzata e la struttura chimica dei materiali organici utilizzati.

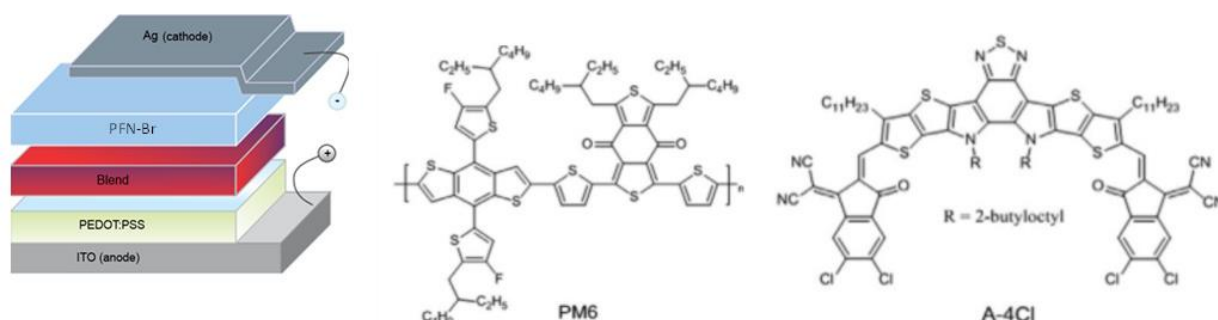


Figura 5 - Architettura della cella fotovoltaica organica utilizzata e struttura chimica dei materiali fotoattivi.

Inizialmente si è proceduto ad ottimizzare la struttura del dispositivo e a mettere a punto la composizione e la morfologia della blend; per agevolare la sperimentazione, si è proceduto alla realizzazione di celle fotovoltaiche in configurazione opaca, ottenute con uno spessore di metallo (Ag) di circa 100 nm. Gli altri strati utilizzati hanno i seguenti spessori: ITO 140 nm, PEDOT:PSS 40 nm, PFN-Br 5 nm. Tutti gli strati, eccetto ITO ed Ag, sono stati ottenuti tramite processi da soluzione (spin-coating). Una volta definita la composizione ideale della blend (rapporto PM6:A-4Cl 1:1.2, come riportato anche in letteratura), si è proceduto ad una campagna di prove per determinare lo spessore ottimale della blend all'interno della struttura al fine di massimizzare le prestazioni elettriche. Sono stati realizzati prototipi di celle organiche variando lo spessore della blend nel range 90 - 130 nm. Tutti i dispositivi realizzati sono stati caratterizzati tramite misura di corrente-tensione sotto luce solare simulata e misura di efficienza quantica esterna.

Il miglior dispositivo è stato ottenuto con uno spessore della blend di 95 nm. In figura 6 viene riportata la caratterizzazione ottica (riflettanza, trasmittanza ed assorbimento) di un film di blend depositato su substrato di vetro, mentre in Figura 7 è riportata la caratterizzazione di uno dei prototipi di cella. L'efficienza di conversione raggiunta è di 14.9% ($J_{sc} = 25.7 \text{ mA/cm}^2$, $V_{oc} = 856 \text{ mV}$ FF = 67.5%). La curva di efficienza quantica esterna mostra una buona fotogenerazione (superiore al 70%) nel range 450-850nm con picchi superiori all'80% intorno a 600 nm.

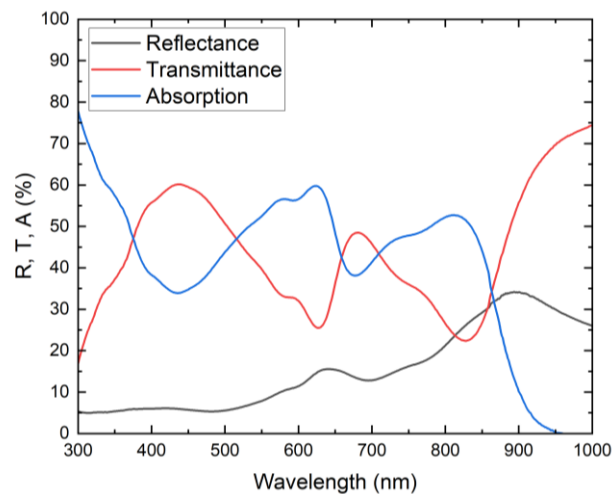


Figura 6 - Spettri di riflettanza, trasmittanza ed assorbimento della blend PM6:A-4Cl depositata su vetro ed utilizzata per la realizzazione dei dispositivi.

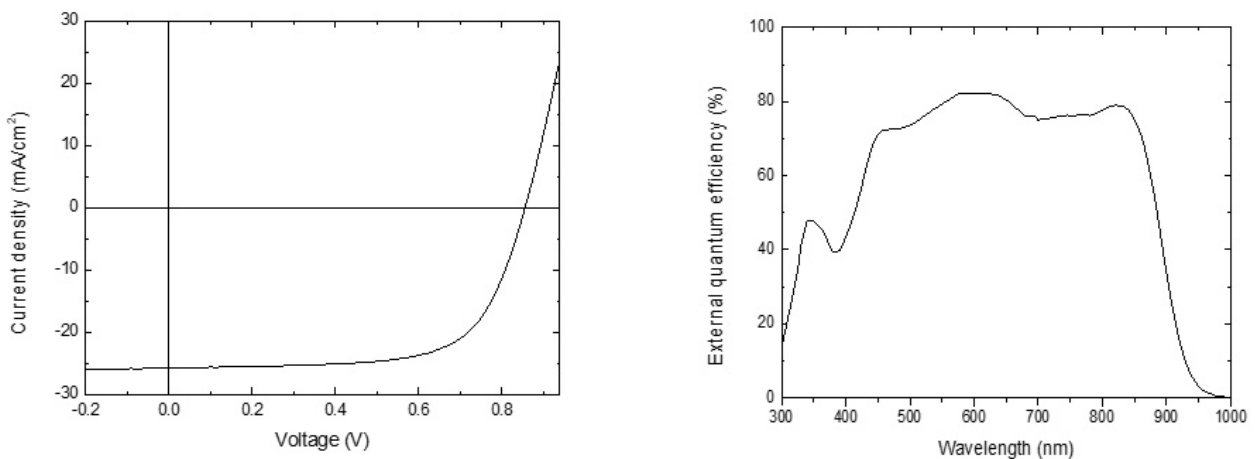


Figura 7 - Caratteristica corrente-tensione sotto luce solare simulata (spettro AM1.5G) di uno dei prototipi di cella realizzati (struttura non trasparente) e curva di efficienza quantica esterna.

Successivamente si è passati alla realizzazione di celle fotovoltaiche organiche "semitrasparenti", idonee quindi all'utilizzo in applicazioni agrivoltaiche. Questi prototipi sono stati ottenuti riducendo lo spessore dell'elettrodo posteriore di Ag a 20 nm, in modo da renderlo semitrasparente e cercando di penalizzare il meno possibile le prestazioni elettriche: in pratica si cerca di ottenere un compromesso tra trasmittanza della cella ed efficienza di conversione.

Nella figura 8 viene riportata la caratterizzazione elettrica al simulatore solare del miglior dispositivo realizzato (area 25 mm²), la caratterizzazione ottica (trasmittanza) di una struttura equivalente di area maggiore (circa 10 cm²) e relativa fotografia all'aperto sotto luce solare. L'efficienza di conversione raggiunta è del 10.0% ($J_{sc} = 23.3 \text{ mA/cm}^2$, $V_{oc} = 850 \text{ mV}$ FF = 50.4%).

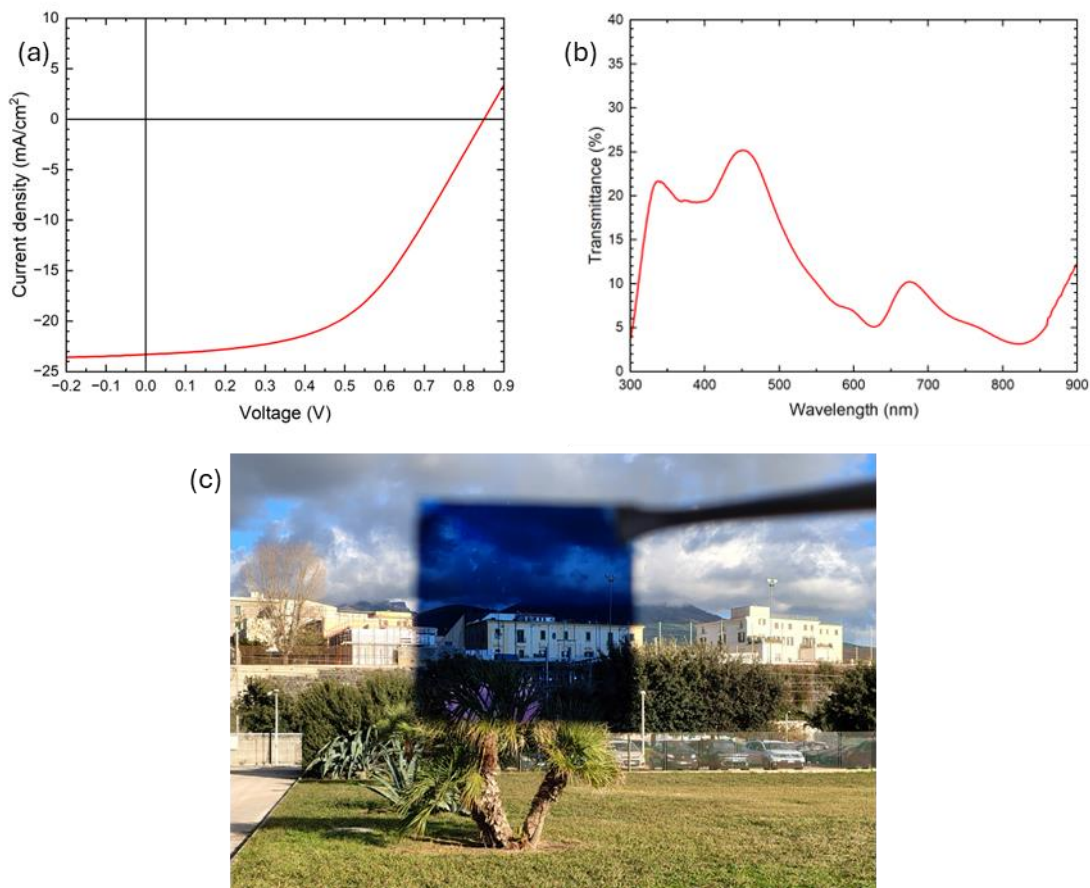


Figura 8 - (a) Caratteristica corrente-tensione sotto luce solare simulata di uno dei prototipi di cella realizzati, (b) trasmittanza e (c) foto all'aperto di una struttura semitrasparente equivalente di area di circa 10 cm².

7.2 Realizzazione di un prototipo di serra con copertura FV

Nello scorso triennio è stata realizzata la struttura di una serra prototipale, formata da due sezioni di dimensioni 40 x 40 cm² e un'opportuna zona di separazione. Le due sezioni, una di test e una di controllo, sono state realizzate usando dei profilati di alluminio e dei pannelli di plexiglass. In figura 9 è riportata l'immagine di una delle due box. Su due lati sono stati inseriti i pannelli di plexiglass e sugli altri due lati una rete per permettere il passaggio di aria. È possibile chiudere questi lati con ulteriori pannelli di plexiglass per creare un ambiente con temperatura e umidità più stabile.



Figura 9 - Struttura della serra.

Nella parte superiore della struttura delle serre inizialmente sono stati realizzati 9 alloggiamenti per mini-moduli FV a film sottile di silicio spettralmente selettivi di area $10 \times 10 \text{ cm}^2$. Successivamente è stato realizzato un alloggiamento per moduli fotovoltaici semitrasparenti di dimensione $30 \times 30 \text{ cm}^2$ (Figura 10).

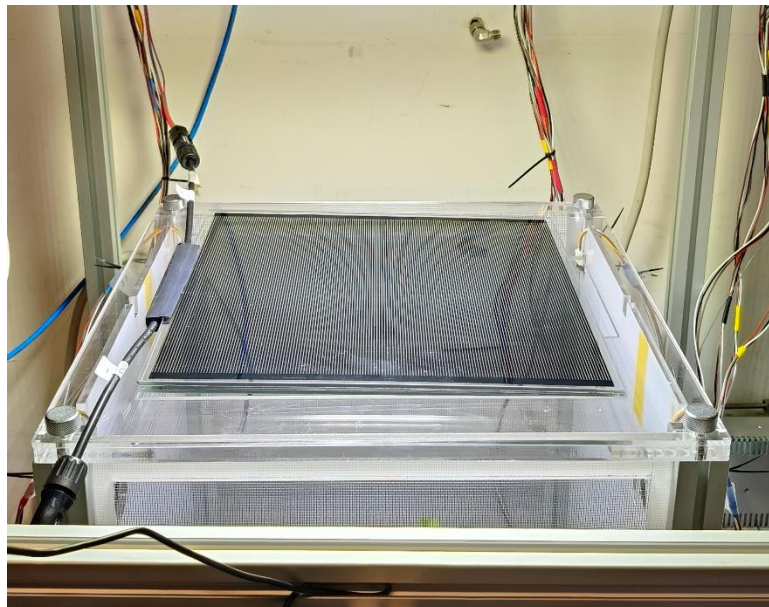


Figura 10 - Alloggiamento per moduli fotovoltaici semitrasparenti di dimensione $30 \times 30 \text{ cm}^2$

Sono stati acquistati dei moduli fotovoltaici a film sottile di CdTe, da $30 \times 30 \text{ cm}^2$, con tre diversi gradi di trasparenza, 40, 60 e 80 %. I moduli sono stati caratterizzati outdoor sotto illuminazione naturale. Le curve Corrente-Tensione ed i rispettivi valori di V_{oc} e I_{sc} sono riportati nella figura 11.

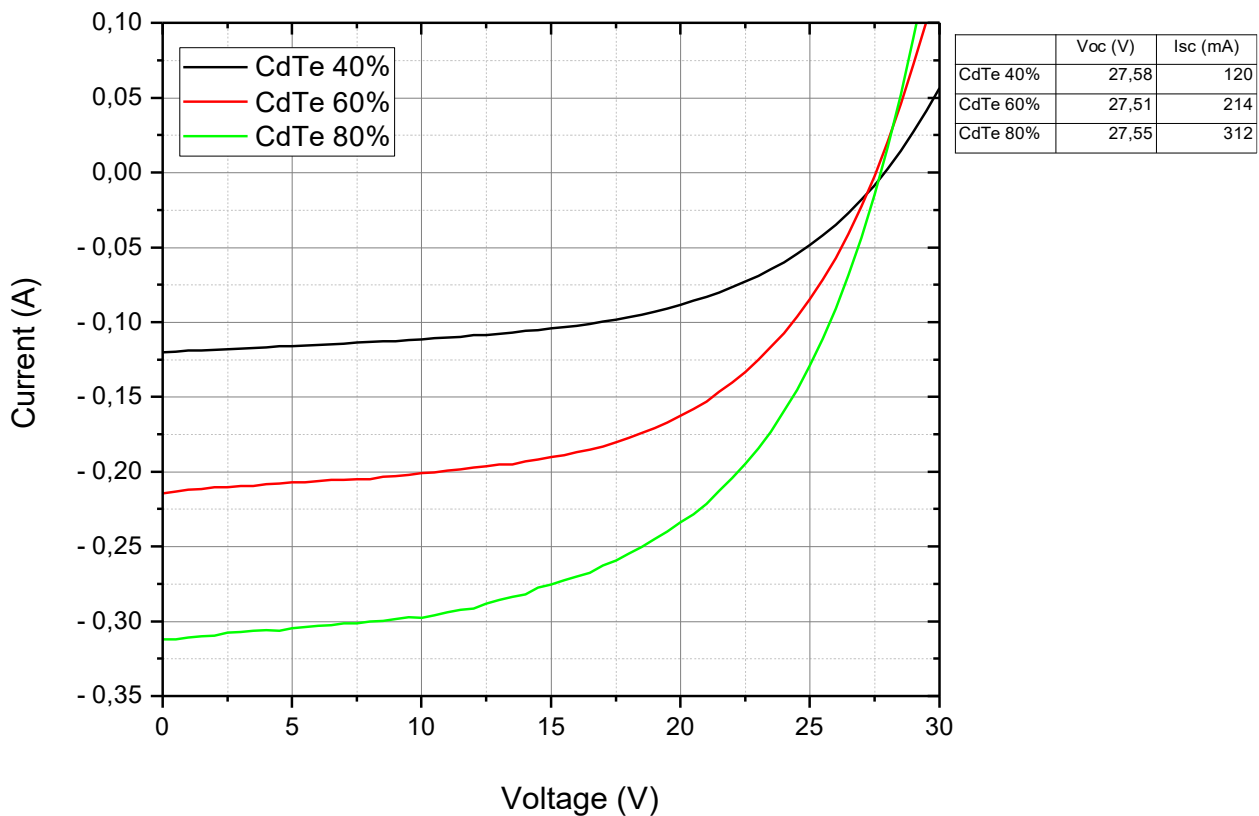


Figura 11 - Curve Corrente-Tensione dei moduli fotovoltaici semitrasparenti a film sottile di CdTe sotto illuminazione naturale.

Le due serre sono state inserite all'interno di una struttura realizzata in plexiglass e profilati di alluminio. Questa struttura serve per alloggiare sulla parte superiore le lampade di illuminazione delle due mini-serre e sulla parte frontale due binari su cui far scorrere manualmente due telecamere, come riportato nella figura 12.



Figura 12 - Serra prototipale completa di struttura di alloggiamento moduli FV, lampade di illuminazione e attrezzatura di controllo e monitoraggio. Il prototipo comprende 2 mini-serre, una di test e una di controllo.

Per l'illuminazione, a seguito di indagini, si è optato per lampade a LED Becar di tipologia utilizzata per sperimentazioni di orticoltura (figura 13). Nello specifico, la lampada è formata da 56 spot luminosi composti da 5 LED, due bianchi, uno blu e due rossi. Tramite un'applicazione Android è possibile pilotare l'intensità dei singoli LED. Lo spettro di emissione della lampada, con tutti i Led accesi al 100%, è riportato nella figura 14.

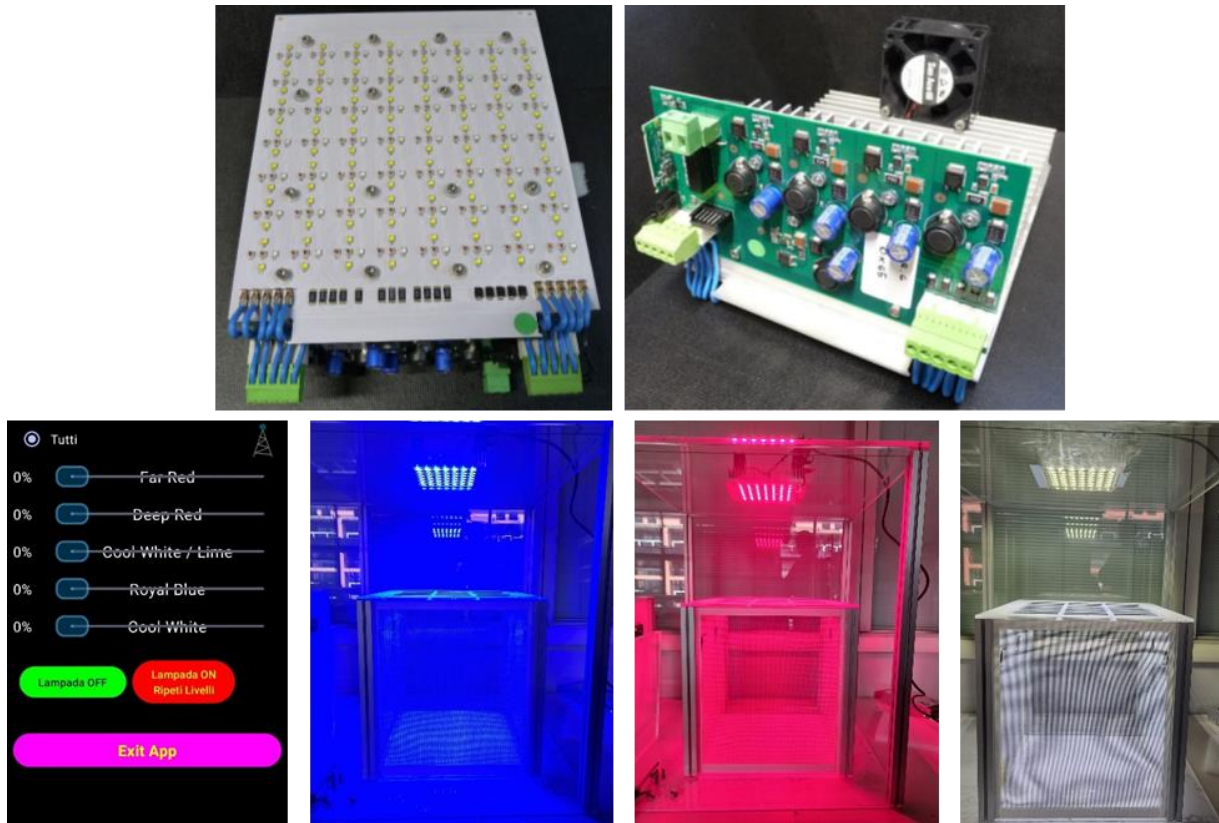


Figura 13 - Illuminazione serra.

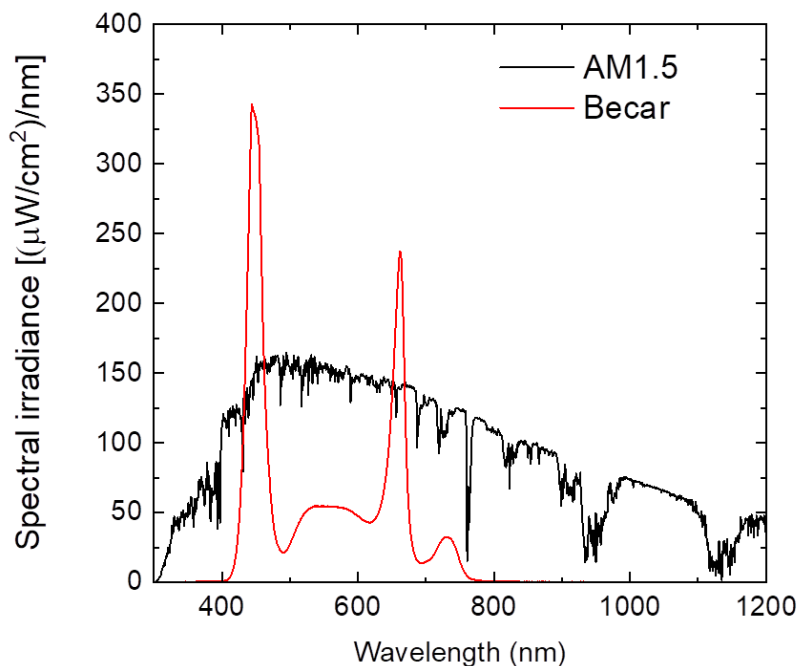


Figura 14 - Spettro della lampada a LED Becar (in rosso). Come riferimento è riportato anche lo spettro solare AM1.5 (in nero).

Le serre sono state completamente automatizzate per il monitoraggio e per l'attuazione degli interventi. Il software permette il controllo remoto tramite interfaccia web e il controllo sul posto tramite display touch e dashboard di monitoraggio. Nella figura 15 è riportata l'architettura del sistema con le unità di controllo, i componenti hardware e le logiche di interconnessione.

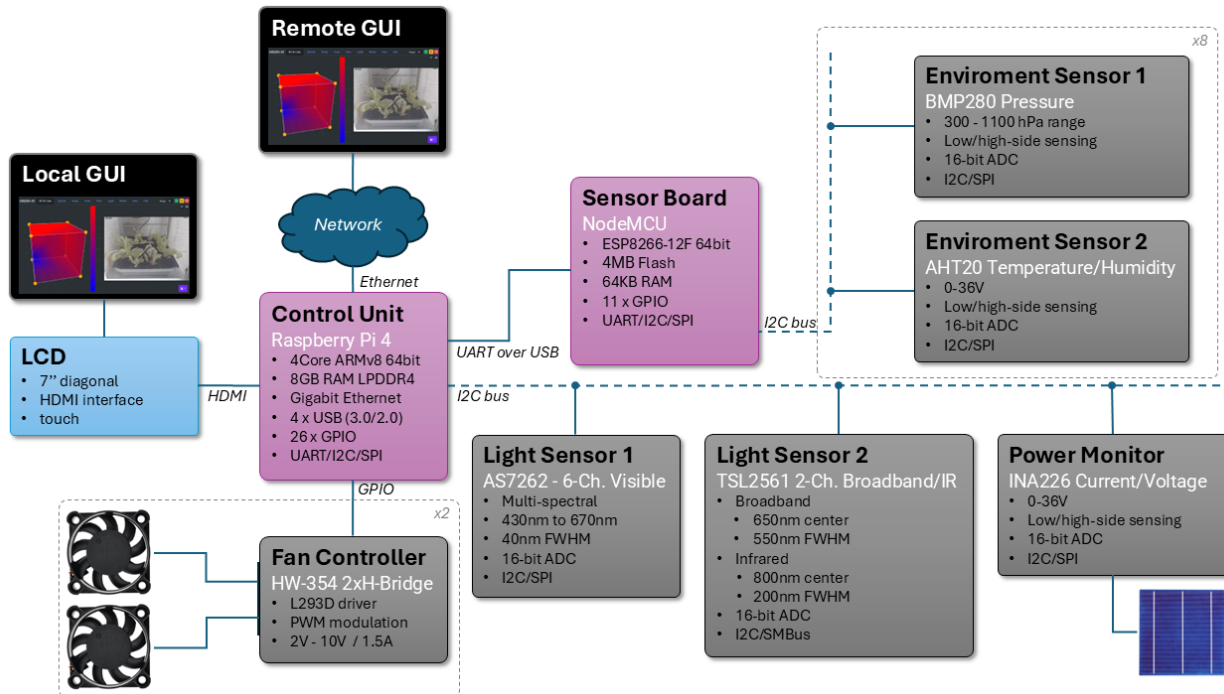


Figura 15 – Architettura del sistema e caratteristiche principali dei componenti.

L'architettura rappresentata integra un sistema di monitoraggio e controllo ambientale multi-sensore, supportato da interfacce utente locali e remote, e basato su una combinazione di Raspberry Pi 4 e NodeMCU ESP8266. Il sistema è progettato per acquisire dati da diversi sensori ambientali e ottici, monitorare le condizioni operative (inclusa la potenza elettrica), e fornire un'interfaccia utente intuitiva sia in locale che da remoto. La comunicazione tra i componenti avviene tramite bus standardizzati (I²C, UART), con particolare attenzione alla scalabilità e alla separazione dei compiti tra acquisizione e gestione dei dati.

Al centro dell'architettura troviamo una Raspberry Pi 4, selezionata per la sua versatilità e capacità di elaborazione. Dotata di un processore quad-core ARMv8 a 64 bit e 8 GB di RAM LPDDR4, questa scheda gestisce il coordinamento del sistema, l'elaborazione dei dati e la visualizzazione delle informazioni. La connettività Ethernet Gigabit consente il collegamento a una GUI remota tramite rete locale o internet, mentre l'uscita HDMI è dedicata a un display LCD touch da 7 pollici, che funge da interfaccia utente locale (figura 16). Oltre alla gestione software, la Raspberry Pi controlla direttamente tramite GPIO due moduli fan controller basati su driver L293D, che regolano ciascuno due ventole con modulazione PWM per la ventilazione attiva delle serre (figura 17).

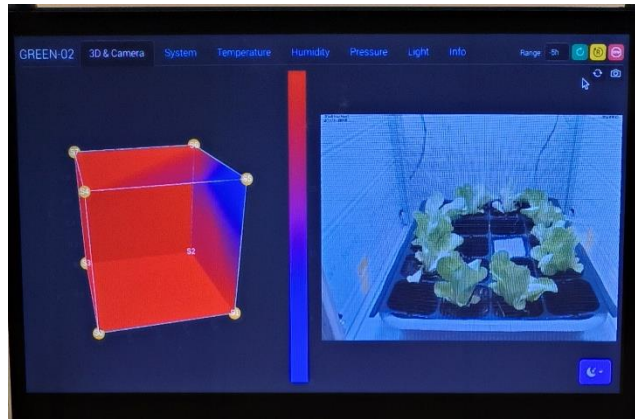


Figura 16 - La GUI presentata sul display 7" direttamente collegato all'unità di controllo.

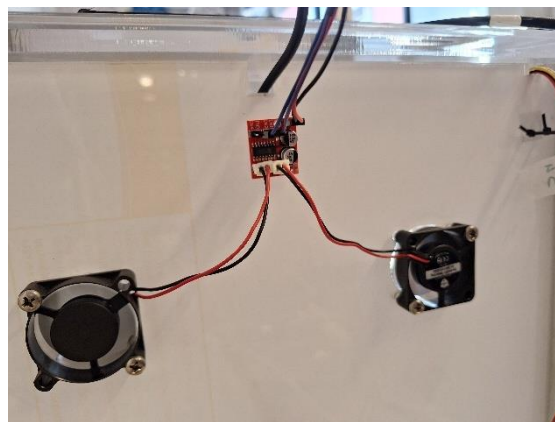


Figura 17 - Foto della parete laterale che mostra la ventilazione attiva delle serre ottenuta con due ventole per lato.

Per la gestione dell'acquisizione dati dai sensori, l'architettura adotta una scheda secondaria basata su NodeMCU ESP8266-12F, un microcontrollore a 32 bit con 4 MB di Flash e 64 KB di RAM. Questo modulo si è reso necessario per raccogliere i dati degli 8 sensori ambientali senza impattare sulle performance del software; esso, infatti, funge da "bridge" tra i sensori e la Raspberry Pi, comunicando tramite UART-over-USB. Grazie al supporto per bus I²C e SPI, il NodeMCU è in grado di gestire più sensori in parallelo, alleggerendo il carico computazionale sulla Raspberry Pi (figura 18).

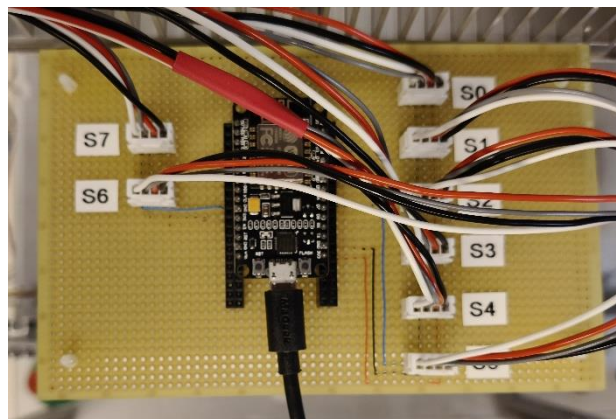


Figura 18 - Scheda sensori e cablaggi dei singoli sensori (8 in totale).

Il sistema integra due sensori principali:

- **BMP280** per la rilevazione della pressione atmosferica (range 300–1100 hPa), con conversione analogico-digitale a 16 bit.
- **AHT20** per la misura combinata di temperatura e umidità relativa, anch'esso dotato di un ADC a 16 bit. Entrambi i sensori supportano interfacce I²C/SPI, garantendo flessibilità nell'integrazione.

Questi due sensori sono forniti in unica soluzione sulla stessa board. Questi moduli consentono un monitoraggio ambientale continuo, utile per applicazioni indoor, outdoor o in ambienti controllati (es. serre, laboratori). Una serie di 8 sensori (per ogni tipo) è stata dislocata negli 8 vertici del box costituente la serra ricostruendo, per interpolazione, la temperatura della massa d'aria contenuta nella serra.

Per monitorare la radiazione luminosa che attraversa il modulo fotovoltaico il sistema è poi dotato di due sensori di luce:

- **AS7262**, un sensore multispettrale a 6 canali con copertura tra 430 nm e 670 nm, adatto ad analisi colorimetriche e ambientali complesse (figura 19).
- **TSL2561**, un sensore a doppio canale per luce visibile e infrarossa, con picchi centrati a 650 nm (visibile) e 800 nm (IR)(figura 20).

Entrambi utilizzano un ADC a 16 bit per garantire precisione nelle misurazioni luminose, rendendo questi moduli ideali per applicazioni in cui la qualità della luce è un parametro critico (es. agricoltura di precisione, analisi fotometrica, controllo qualità).

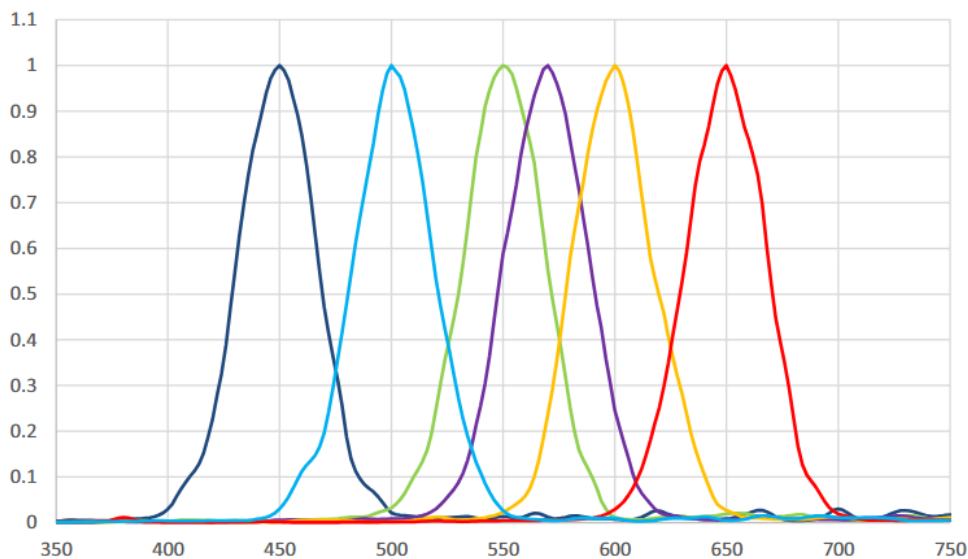


Figura 19 - Risposta normalizzata del sensore multispettrale

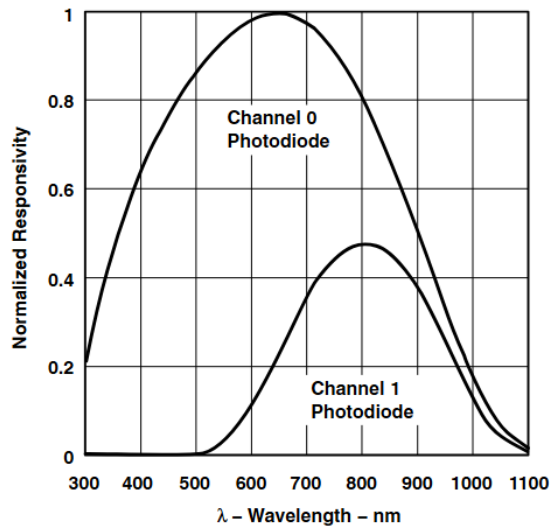


Figura 20 - Risposta normalizzata del sensore dual-band. Il canale 0 è quello broadband mentre il canale 1 è quello infrared

Per la gestione e il monitoraggio della produzione elettrica del modulo fotovoltaico, è presente un sensore INA226, progettato per misurare tensione fino a 36 V e corrente (figura 21). Grazie alla possibilità di misurare sia in configurazione low-side che high-side, e all'interfaccia I²C/SPI, il modulo di power sensing offre un'ottima integrazione in sistemi a basso consumo e a batteria. In questo caso, viene utilizzato per il monitoraggio dei parametri del pannello fotovoltaico in modo da raccogliere tensione e corrente nel tempo.



Figura 21- Modulo di power sensing. Si noti la "shunt resistance" per il monitoraggio della corrente.

Il sistema prevede due modalità di interazione:

- **Local GUI**, visualizzata tramite il display touch LCD HDMI collegato alla Raspberry Pi, che consente il controllo diretto e immediato delle funzioni.
- **Remote GUI**, accessibile via rete, che consente il monitoraggio e la gestione remota del sistema. È possibile, inoltre, scaricare i dataset delle serie temporali.

Entrambe le interfacce presentano dati in tempo reale raccolti dai sensori, offrendo un'esperienza utente coerente e completa. L'interfaccia è dotata di diverse schede, in ognuna delle quali è possibile monitorare diversi parametri (vedi appendice allegata).

Bibliografia

- [1] F. Carteni, M. Zotti, F. Giannino, G. Bonanomi, R. Motti, S. Mazzoleni, Sperimentazione di multistrati a film sottile e moduli BIPV per involucri vetriati semitrasparenti in serra, Report RdS/PTR(2021)/329
- [2] M. Zotti, S. Mazzoleni, L.V. Mercaldo, M. Della Noce, M. Ferrara, P. Delli Veneri, M. Diano, S. Esposito, F. Carteni, Testing the effect of semi-transparent spectrally selective thin film photovoltaics for agrivoltaic application: A multi-experimental and multi-specific approach, Heliyon 10 (2024) e26323.

8 Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte

Non sono state utilizzate consulenze all'interno della LA.

9 Pubblicazioni scientifiche

M. Zotti, S. Mazzoleni, L.V. Mercaldo, M. Della Noce, M. Ferrara, P. Delli Veneri, M. Diano, S. Esposito, F. Carteni, Testing the effect of semi-transparent spectrally selective thin film photovoltaics for agrivoltaic application: A multi-experimental and multi-specific approach, *Heliyon* 10 (2024) e26323.

10 Eventi di disseminazione

- Invited talk: L.V. Mercaldo, "Materials, approaches, and device architectures for the challenges of photovoltaics", Winter Workshop on Materials for Energy - wWME 2024, Brixen (BZ), Jan. 28 - Feb. 2

- Oral contribution: L.V. Mercaldo, "Novel organic and inorganic spectrally-selective thin film photovoltaics for greenhouse application", 2nd annual conference Rete IFV, Bolzano 11 - 12 giugno 2024

- Panel discussion: Applications of PV. Moderator: Paola Delli Veneri (ENEA); Speakers: Lucia V. Mercaldo (ENEA), Francesco Di Giacomo (Solertix), Alex Sangiorgi (CNR-ISSMC), Ivan Foglia (i-pergola), Stefano Marian (Polytechnic University of Milan); 2nd annual conference Rete IFV, Bolzano 11 - 12 giugno 2024